А. В. Иванов, В. В. Жуков, И. Н. Маров,
В. С. Урусов

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ЭПР ТОНКОДИСПЕРСНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА В ОБРАЗЦАХ РЕГОЛИТА «ЛУНЫ-16» И «ЛУНЫ-20»

Проведено исследование интенсивности и характера спектров ЭПР вещества реголита разных гранулометрических и литологических фракций, а также изучено влияние на параметры спектров механического, химического и термического воздействия на вещество. Регистрируемое методом ЭПР в лунном реголите тонкодисперсное суперпарамагнитное металлическое железо имеет эндогенное происхождение, причем ведущим процессом в его образовании является восстановление лунного двухвалентного железа компонентами солнечного ветра.

Введение

Породы, слагающие поверхность Луны и послужившие основой для образования реголита, содержат значительное количество железа. Оно находится в реголите, по крайней мере, в трех различных формах: 1) двухвалентное железо Fe^{2+} в силикатной, окисной и некоторых других фазах (карбиды, фосфиды); 2) металлические частицы (тэнит и камасит) метеоритного и лунного происхождения; 3) тонкодисперсное железо (скопление атомов размером 150 — 300 Å и меньше) на поверхности частиц реголита. Трехвалентное железо, если и обнаруживается иногда физическими методами в породах Луны, то его содержание совершенно незначительно (меньше 1% от общего содержания железа). Тонкодисперсное металлическое железо, удивительно устойчивое в условиях земной атмосферы (оно сохраняется без видимых изменений в течение нескольких лет), обнаружено в реголите из различных мест образования почти одновременно и независимо различными методами: измерениями магнитной восприимчивости [12, 13], рентгеноэлектронной [1, 15], мессбауэровской [8, 9] и ЭПР — спектроскопии [5, 11, 14]. Измерения магнитной восприимчивости приводят к выводу, что эта фаза представлена очень мелкими ($<$ 150 Å) суперпарамагнитными однодоменными частицами. В рентгеноэлектронных спектрах она проявляется благодаря относительно большой площади поверхности, покрытой этими мелкими частицами. Мессбауэровские измерения дают информацию об этой фазе вследствие появления «избыточного» компонента интенсивности поглощения вблизи нулевых скоростей движения поглотителя относительно источника. В связи со способом обнаружения эту форму железа иногда называют «избыточным» железом, в отличие от металлических частиц более крупного макроскопического размера, которые часто имеют метеоритное происхождение.

Отнесение сигнала ЭПР к тонкодисперсному состоянию металлического железа, а не к ионам Fe^{3+} сделано в работах [11, 14] на основании расчета формы линий ЭПР, а в работе [5] — на основании исследования интенсивности сигнала, которая значительно выше реальной для любых концентраций парамагнитного трехвалентного железа. Впрочем, до сих пор обсуждается на основе данных метода ЭПР [7, 16] и возможность присутствия в лунных породах некоторого количества магнетитоподобного [7] или титаномагнетитового [16] окисла. Тонкодисперсная форма металлического железа с весьма необычными свойствами, которую чрезвычайно трудно воспроизвести в земных условиях, является одной из наиболее специфических особенностей лунного реголита. Изучение этой фазы, ее распространенности и свойств, в состоянии пролить свет на вопросы происхождения и формирования реголита. Эту задачу ставил перед нами А. П. Виноградов. В настоящей работе исследование проводилось в двух основных направлениях:

1) выяснение распределения и определение относительной концентрации тонкодисперсной формы железа в образцах лунных реголитов различных фракций и местоположения;

2) установление влияния термических, механических и химических воздействий на поведение и изменение «избыточного» железа.

Выбор образцов и методика исследования

Определение интенсивности сигнала ЭПР проводилось на образцах реголита из колонок «Луны-16» и «Луны-20». По характеру отбора образцы могут быть подразделены на две группы. Первая группа представлена образцами, отобранными из обеих колонок по зонам. Из каждой зоны исследовали три гранулометрические фракции реголита размером зерен <83, 83—125 и 125—200 *мкм* без какого-либо дополнительного разделения вещества фракций. Ко второй группе относятся образцы, представляющие собой зерна пород или минералов определенных типов, которые отобраны под микроскопом вручную из гранулометрических фракций 200—450 и 450—900 *мкм*. Вес отдельных образцов колебался от 0,4 до 3,5 *мг* и в большинстве случаев равен 1—2 *мг*. Для всех образцов измеряли интенсивность сигнала ЭПР без какого-либо предварительного воздействия на вещество. Кроме того, вещество некоторых образцов подвергали дополнительным воздействиям: растиранию в порошок, растворению в 3%-ной HCl в течение 10 *мин* и нагреванию на воздухе в течение 3—4 *час* до 100—900° С.

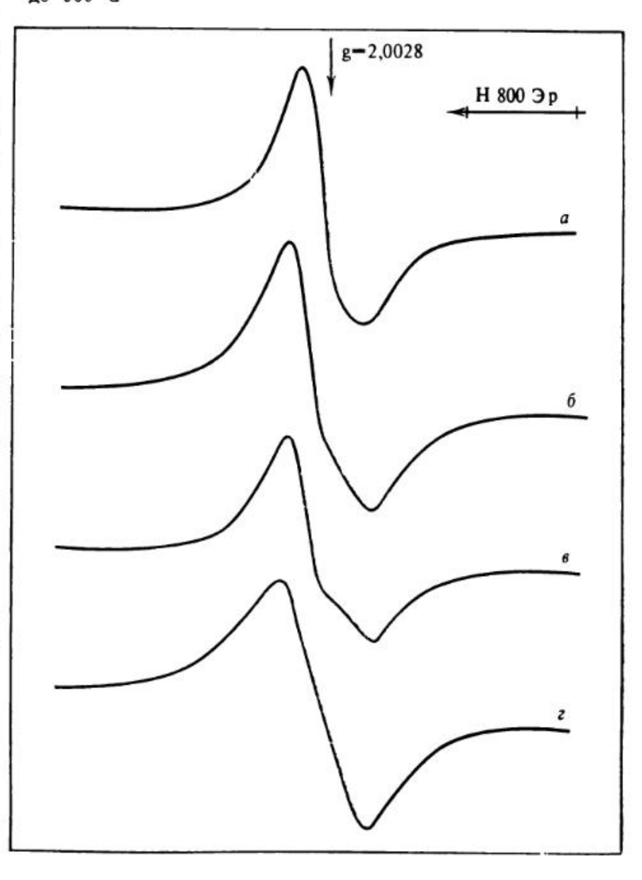
В настоящей статье мы придерживаемся стандартного обозначения образцов. Номер образца состоит из 4 цифр, обозначающих номер пробы, и (через дефис) — индекса гранулометрической фракции. Первые две цифры образца являются номером автоматической станции, доставившей грунт (соответственно «16» или «20»), две вторые цифры обозначают собственно номер пробы по колонке. Для «Луны-16» порядок расположения проб по колонке сверху вниз: 1603—1606—1609—1608, для «Луны-20» соответственно 2001—2002—2003—2004. Для проб обоих станций установлены следующие индексы гранулометрических фракций: <83 *мкм* = 1; 83—125 *мкм* = 2; 125—200 *мкм* = 3; 200—450 *мкм* = 4; 450—900 *мкм* = 5.

Спектры ЭПР получены на радиоспектрометре $V = 4502-15A$ на частоте ~ 900 *Мгц*. Напряженность магнитного поля определяли ядерным измерителем ИМИ-2 с частотомером Ч3-4. Частоту СВЧ измеряли гетеродинным частотомером Ч4-5. Спектры ЭПР получены при температуре +25° С, которая устанавливалась с помощью термостатирующего устройства V = 4257. В одну «половину» двойного резонатора V=4352 помещали образец реголита в стандартной кварцевой ампуле, а в другую — стандартный образец Strong pitch с $g = 2{,}002$ фирмы Varian. По интенсивности сигнала ЭПР Strong pitch учитывали изменение добротности резонатора образцом. Все спектры получены в одинаковых условиях: при постоянных положениях образцов в резонаторе спектрометра, температуре, мощности СВЧ, амплитуде модуляции (100 *кгц*) магнитного поля и развертке магнитного поля. Уровень мощности СВЧ обеспечивал отсутствие насыщения для всех сигналов. Линейность калибровки усиления в спектрометре проверяли сравнением интенсивностей сигналов ЭПР свободного радикала Strong pitch, записанных при различном усилении.

Сигналы ЭПР лунного реголита состоят из широкой асимметричной линии (рис. 1) с эф-

Рис. 1. Вид характерных спектров ЭПР лунных образцов

а — 2004-3; *б* — 1603-3; *в* — агглютинаты из обр. 1603-4; *г* — агглютинаты из обр. 1603-4 после нагревания на воздухе до 900° С



фективной величиной g-фактора (g^*), измеренной по точке пересечения сигнала ЭПР с нулевой линией спектра, $g^* = (2{,}13-2{,}06) \pm 0{,}03$. Интенсивность сигнала ЭПР пропорциональна количеству сигналящих частиц, т. е. она определяет относительное содержание железа в образцах. Приведенную к весу образца интенсивность линий в спектрах ($I_{прив}$) вычисляли по формуле:

$$I_{прив} = A \cdot (\Delta U)^2 / S \cdot A_{pitch} \cdot m, \qquad (1)$$

где A — амплитуда сигнала, ΔU — ширина линии ЭПР между точками максимального наклона, S — усиление сигнала, A_{pitch} — амплитуда сигнала стандарта Strong pitch, m — вес образца. Во всех сериях измерений по нескольку раз записывали спектры ЭПР трех образцов реголита: 2004-3, 1603-3 и 2001-3, выбранных в качестве стандартов. Так как в работе проводилось не абсолютное, а относительное определение содержания железа в образцах, то результаты всех измерений выражены в виде отношения интенсивности сигнала ЭПР N-го образца к интенсивности стандартного обр. 2004-3:

$$I_{отн}(N) = \frac{I_{прив}(N)}{I_{прив}(2004\text{-}3)}. \qquad (2)$$

Выбор обр. 2004-3 в качестве стандарта произволен и связан лишь с тем, что интенсивность его сигнала ЭПР близка к средней интенсивности сигналов других образцов. Определение $I_{отн}(N)$ проводили не менее чем по двум-трем измерениям. Средний разброс значений $I_{отн}(N)$ по нескольким измерениям составляет 10—15%. Отклонения отдельных значений $I_{отн}(N)$ от их среднего значения не превосходят 30%. Для того чтобы проверить применимость формулы (1) для определения интенсивности сигналов ЭПР лунного реголита, проведено интегрирование спектров всех образцов с помощью электронной нелинейной моделирующей установки МН-7. Площади под кривыми поглощения определяли взвешиванием. Определение $I_{отн}(N)$ этими двумя методами по формуле (1) и прямым интегрированием спектров, дало результаты во всех случаях различающиеся не более чем на 30%. Эта величина не превышает максимальных отклонений $I_{отн}(N)$ от усредненной по нескольким измерениям величины. Поэтому $\delta = \pm 30\%$ является максимальной возможной погрешностью определения $I_{отн}(N)$.

Результаты измерений и экспериментов

В табл. 1 приведены результаты измерения относительной интенсивности сигналов ЭПР мелких фракций реголита из колонок «Луны-16» и «Луны-20», которая для неизмененных образцов может рассматриваться как показатель содержания тонкодисперсного металлического железа. Анализ таблицы показывает следующие основные закономерности.

1. Содержание тонкодисперсного железа в образцах морского реголита «Луны-16» примерно в 3,1 раза выше, чем в образцах материкового реголита «Луны-20» (соответствующие средние по всем измеренным образцам равны 6,5 и 2,1).

2. Для образцов «Луны-20» наблюдается четкая зависимость содержания тонкодисперсного металлического железа от глубины и размера частиц образца: содержание железа уменьшается с возрастанием глубины и с увеличением размера фракции.

3. Для образцов «Луны-16» каких-либо закономерных изменений в содержании тонкодисперсного металлического железа не наблюдается.

Четкое различие между веществом «Луны-16» и «Луны-20» отмечается и при измерении образцов, отобранных из одной и той же фракции. Из каждой фракции отбирали и измеряли несколько образцов — аликвот; в табл. 1 приведены средние цифры. При этом для «Луны-20» относительное содержание тонкодисперсного железа в отдельных аликвотах практически постоянно (так, для трех аликвот обр. 2001-3 величины содержания равны 2,2; 2,2; 2,3),

Таблица 1

Относительная интенсивность сигналов ЭПР мелких фракций реголита

Гранулометрический индекс фракции (размер частиц, *мкм*)	Номера образцов			
	«Луна-16»			
	1603	1606	1609	1608
1(<83)	6,8	—	5,0	6,4
2(83—125)	7,4	5,0	4,9	6,4
3(125—200)	7,0	6,4	10,0	5,9
	«Луна-20»			
	2001	2002	2003	2004
1(<83)	3,5	2,5	2,0	2,0
2(83—125)	4,3	2,4	1,4	1,1
3(125—200)	2,2	2,2	1,1	1,0

тогда как для «Луны-16» расхождения в содержании тонкодисперсного железа в аликвотах весьма велики (для четырех аликвот обр. 1608-2: 2,2; 4,4; 5,8; 13). Весьма показательны для выявления характера распределения тонкодисперсного железа в лунном реголите результаты исследования зерен пород и минералов определенных типов (табл. 2, ст. 4). Эти результаты показывают, что основная часть тонкодисперсного железа связана с частицами вторичных пород, претерпевшими интенсивное преобразование на лунной поверхности — с частицами реголитовых брекчий и особенно агглютинатов. В то же время содержание тонкодисперсного железа в частицах первичных пород и зернах минералов из них очень невысоко, причем в материковых породах из сборов «Луны-20» заметно ниже, чем в морских, доставленных «Луной-16». Следует также отметить, что, судя по морским образцам из сборов «Луны-16», для агглютинатов характерно весьма переменное содержание тонкодисперсного железа (надо иметь в виду, что каждый из измеренных образцов включает несколько — не менее десяти — зерен данного типа), тогда как для первичных морских пород характерно скорее постоянное — в пределах отдельных типов базальтов — содержание этого железа. Влияние различного вида предварительной обработки вещества на интенсивность сигнала ЭПР приводится в табл. 2 и на рис. 2.

Растирание вещества в порошок проводилось нами только для фракций реголита в целом. Такое интенсивное механическое воздействие приводит к некоторому снижению интенсивности

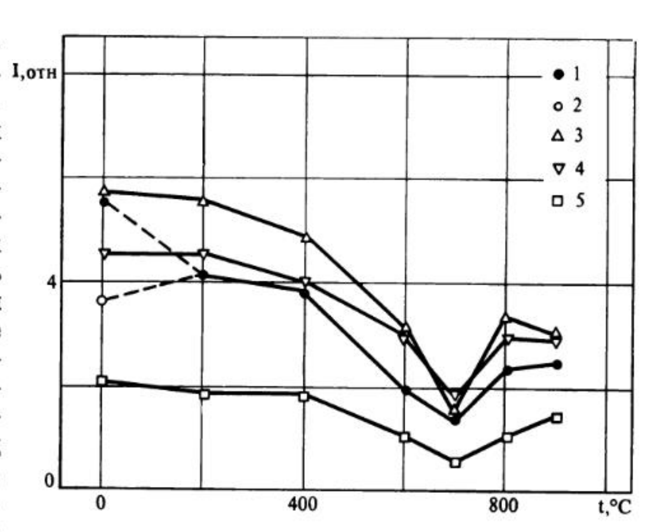


Рис. 2. Изменение относительной интенсивности спектров ЭПР при нагревании образцов

1 — обр. 1603-3; *2* — он же после растирания в порошок; *3* — обр. 1608-2а; *4* — обр. 1608-2б; *5* — обр. 2001-1

сигнала — уменьшению количества тонкодисперсного железа (см. рис. 2, обр. 1603-3), очевидно, за счет вскрытия отдельных железных частиц и их окисления. В то же время следует отметить, что аналогичное воздействие полностью уничтожает металлическое железо, регистрируемое рентгеноэлектронным методом [2]. Отмеченное различие может быть связано с тем, что рентгеноэлектронным методом регистрируется тонкодисперсное металлическое железо, только находящееся на поверхности, тогда как

Таблица 2

Относительная интенсивность сигналов ЭПР частиц пород и минералов различных типов

№ п/п	Тип породы	Номер пробы	Интенсивность сигнала					
			первоначальная	действие HCl	нагрев 300°	нагрев 400°	нагрев 700°	нагрев 900°
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Базальт к.з.	1603-4	0,11	0,05	—	—	—	—
2	Базальт к.з.	1603-4	0,11	—	0,08	0,07	0,09	0,59
3	Базальт м.з.	1603-4	0,31	—	0,23	0,22	—	—
4	Базальт м.з.	1603-5	0,30	—	—	—	—	—
5	Брекчия реголитовая	1603-5	3,6	—	—	—	—	—
6	Агглютинаты (спеки)	1603-4	9,5	—	—	10	2,5	4,8
7	» »	1603-4	20	—	—	—	—	—
8	» »	1603-5	7,4	—	—	—	—	—
9	Оливин	1603-4	0,10	—	—	—	—	—
10	Материковый базальт	2001-5	0,05	—	—	—	—	—
11	Агглютинаты (спеки)	2001-5	4,6	—	—	—	—	—
12	Плагиоклаз	2001-5	0,006	<0,001	—	—	—	—

Примечание. к.з. — крупнозернистый, м.з. — мелкозернистый.

методом ЭПР учитывается железо по всему объему образца.

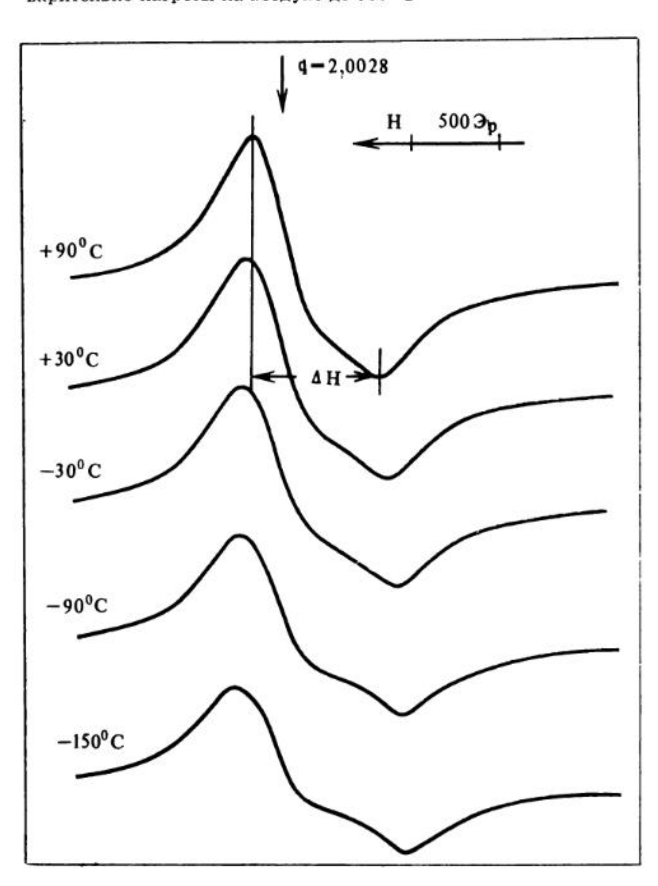
Влияние воздействия 3%-ной HCl резко различается в зависимости от типа образцов. Если для фракций реголита в целом в этом случае содержание тонкодисперсного железа в образцах практически не меняется (эти данные в таблице не приводятся), то в образце морского базальта содержание железа снизилось в 2 раза, а отдельные зерна плагиоклаза из материкового реголита «Луны-20» полностью потеряли металлическое железо. Эти данные определенно указывают, что в первичных породах тонкодисперсное металлическое железо сосредоточено на поверхности зерен. Такой вывод согласуется с результатами опыта по динамике изменения интенсивности сигнала ЭПР зерна оливина при воздействии соляной кислоты [5]. Результаты нагревания образцов фракций реголита в целом показывают (см. рис. 2), что до температуры 400° С происходит в общем незначительное уменьшение интенсивности сигнала ЭПР, вызванное уменьшением содержания тонкодисперсного железа. При нагревании образцов выше этой температуры интенсивность сигнала резко уменьшается и достигает минимума при 700° С. При этом интенсивность сигнала составляет примерно $^1/_3$ от первоначальной. Дальнейшее нагревание приводит к значительному возрастанию интенсивности сигнала ЭПР уже при температуре 800° С. Изменение интенсивности сигнала ЭПР образца агглютинатов (см. табл. 2) аналогично такому для гранулометрических фракций реголита в целом: интенсивность сигнала начинает падать при нагревании выше 400° С, достигает минимума при 700° С и затем вновь возрастает.

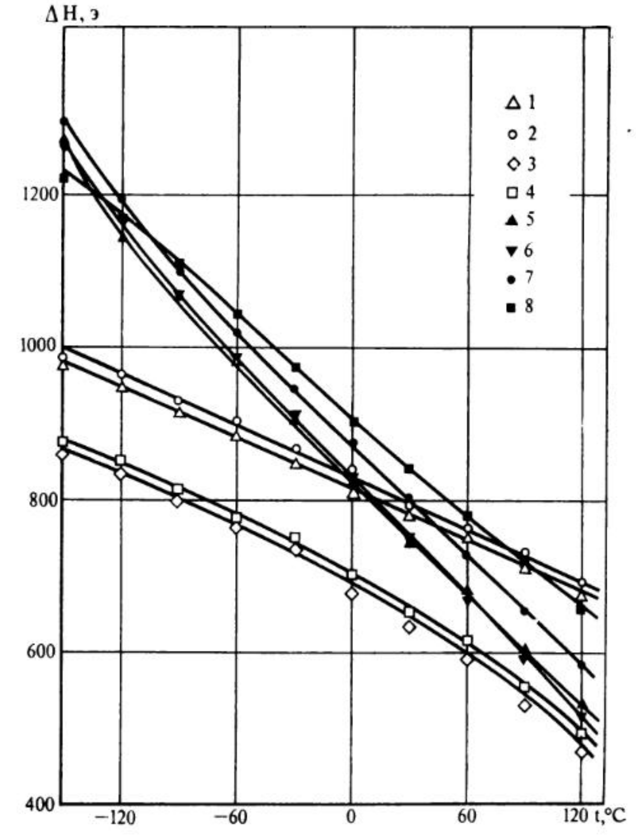
Существенно иной характер носит изменение сигнала при нагревании образца морских базальтов (см. табл. 2). Здесь при нагревании до 300° С интенсивность сигнала несколько уменьшается и в дальнейшем остается в общем постоянной до 700° С. Интересно отметить, что

Рис. 3. Вид спектров ЭПР образца реголита 1603-3 в зависимости от температуры измерения (в °С)

Рис. 4. Зависимость ширины линий в спектрах ЭПР лунных образцов от температуры измерения

1 — обр. 1603-3; *2* — агглютинаты из обр. 1603-4; *3* — обр. 2004-3; *4* — обр. 2001-3; *5* — обр. 1603-3; *6* — обр. 1608-2; *7* — агглютинаты из обр. 1603-4; *8* — обр. 2001-1; образцы 5—8 предварительно нагреты на воздухе до 900° С





при нагревании до 900° С интенсивность сигнала очень сильно возрастает, примерно в 5 раз превышая первоначальное значение. При повторном нагреве до 700° С образцов, подвергшихся перед этим нагреванию до 900° С, никаких изменений в интенсивности и характере сигнала не происходит. Характер изменения интенсивности сигналов ЭПР (см. рис. 2) отражает ход окисления тонкодисперсного металлического железа в результате температурного воздействия на воздухе. Уменьшение интенсивности сигнала при нагревании образцов до примерно 700° С, по-видимому, связано с начальной стадией окисления с образованием вюстита FeO, не дающего сигналов ЭПР в исследуемой области. Нагревание до более высоких температур приводит, вероятно, к образованию ферримагнитной фазы — однодоменных частиц магнетита $Fe^{2+}Fe^{3+}{}_2O_4$, что и приводит к возрастанию интенсивности сигнала. В соответствии с долей трехвалентного железа в магнетите, активного в спектрах ЭПР, интенсивность сигнала достигает примерно $^1/_2$—$^2/_3$ первоначальной.

Для проверки предположения об образовании магнетита исследована зависимость ширины линий в спектрах ЭПР от температуры измерения для образцов, нагревавшихся до 900° С и не подвергавшихся термической обработке. Измерения проводились в интервале от —160 до +120° С. На рис. 3 показан вид спектров одного из образцов при разных температурах измерения. Рис. 4 демонстрирует температурную зависимость ширины линии ЭПР $\Delta H(T)$, измеренной между точками максимального наклона линии поглощения. Как видно из этого рисунка, характер зависимости (угол наклона) $\Delta H(T)$ для образцов, подвергавшихся и не подвергавшихся нагреванию, заметно различаются, что отражает различия в фазовом составе ферромагнитной фракции. Показанная здесь зависимость $\Delta H(T)$ практически совпадает с обнаруженной в работах [7, 16], в которых сопоставлены зависимости $\Delta H(T)$ образцов лунного реголита и содержащих тонкодисперсную магнетитоподобную фазу синтетических стекол. Этими работами установлено, что для образцов реголита значения $\Delta H(T)$ уменьшаются с увеличением температуры значительно медленнее, чем для образцов с магнетитоподобной фазой. Магнетитоподобный характер фаз, образующихся на конечных стадиях термической обработки, согласуется с фактом, что повторное нагревание до 700° С не изменяет интенсивности и ширины линий сигнала ЭПР. С указанных позиций значительное возрастание интенсивности сигнала образца морских базальтов в результате нагревания до 900° С можно объяснить происходящим при этих температурах частичным твердофазовым распадом железосодержащих минералов с образованием при окислении на воздухе магнетитоподобной шпинели.

Обсуждение результатов

Приведенный в предыдущем разделе фактический материал позволяет сделать достаточно однозначный вывод об экзогенном происхождении присутствующего в лунном реголите тонкодисперсного суперпарамагнитного металлического железа. На это указывают, в частности, концентрация тонкодисперсного железа в основном во вторичных частицах, главным образом, в агглютинатах, и приуроченность железа, присутствующего во фрагментах первичных пород, к поверхностным зонам фрагментов. О том же свидетельствует и характер распределения тонкодисперсного железа в разных фракциях реголита «Луны-20»: увеличение его содержания в поверхностных зонах, подвергшихся более интенсивному воздействию космогенных факторов, и в более мелких фракциях, имеющих большую удельную поверхность. Однако такой закономерности не наблюдается для образцов реголита «Луны-16». Мы связываем отмеченное различие, как и ряд других характеристик образцов «Луны-16» и «Луны-20» [6], с различным структурным положением районов отбора этих образцов. В материковом районе с изрезанным рельефом следует ожидать направленного закономерного переноса материала, что приводит, в частности, к закономерному изменению содержания тонкодисперсного железа по глубине залегания и размерам частиц. Для равнинных областей лунных морей в общем более характерно случайное перемешивание материала, что выражается в данном случае в нерегулярном распределении тонкодисперсного железа.

Существует, очевидно, ряд экзогенных факторов и механизмов образования тонкодисперсного металлического железа в лунном реголите, которые в первом приближении могут быть разделены на две группы. К первой из них относятся процессы восстановления двухвалентного железа, входящего в состав лунных минералов, под действием протонов и в меньшей степени углерода солнечного ветра. Как показывают расчеты, приведенные в [10], в результате восстановления протонами солнечного ветра может образоваться металлическое же-

лезо, на 2 порядка превышающее по количеству реально присутствующее в лунном реголите. Ко второй группе относятся процессы, связанные с метеоритной и микрометеоритной бомбардировкой лунной поверхности: испарение и конденсация метеоритного металла и испарение, диссоциация и конденсация железа, входящего в состав железосодержащих минералов лунных пород. Широкое развитие и важное значение процессов испарения и конденсации при формировании лунного реголита в настоящее время достаточно хорошо известно, причем показано [4], что таким процессам подвергаются не только легколетучие элементы типа щелочей, но и петрогенные элементы умеренной летучести, в том числе и железо. Кроме того, при плавлении в результате микрометеоритной бомбардировки может происходить объединение отдельных атомов железа (образовавшихся в результате действия иных факторов, в первую очередь компонентов солнечного ветра) в более крупные агрегаты, обладающие суперпарамагнитными свойстами.

Количество тонкодисперсного металлического железа, образующееся в результате действия любого из указанных экзогенных процессов, является функцией зрелости реголита, т. е. его экспозиционного возраста. И в этом плане естественно, что в более зрелом реголите «Луны-16» содержание тонкодисперсного железа выше. Но эта разница в содержании слишком велика, чтобы ее можно было объяснить только различием в величинах экспозиционного возраста, которые составляют для вещества «Луны-16» и «Луны-20» 450 и 280 млн. лет соответственно [3]. Однако только один из указанных процессов — испарение и конденсация метеоритного металла — является функцией только экспозиционного возраста, и это позволяет сделать вывод, что такой процесс во всяком случае не является ведущим в образовании тонкодисперсного железа. О том же свидетельствует и низкое содержание никеля в тонкодисперсном железе, которое было вычислено по результатам измерения ширины линий сигнала ЭПР при различной температуре измерения (см. рис. 3) на основании данных по зависимости ширины линий от содержания никеля, приведенных в работе [7]. Среднее отношение Ni/Fe в тонкозернистом железе образцов реголита «Луны-20» составляет $2{,}3 \cdot 10^{-3}$, реголита «Луны-16» — $1{,}3 \cdot 10^{-3}$, последнее значение согласуется с величиной, приведенной для образцов «Луны-16» в работе [7].

С другой стороны, количество тонкодисперсного железа, возникающего при восстановлении двухвалентного железа компонентами солнечного ветра и при испарении и диссоциации железа лунных пород, контролируется как временем действия этих факторов, т. е. экспозиционным возрастом, так и содержанием железа в породах мишени. Содержание общего железа в морском реголите «Луны-16» примерно в 2,3 раза выше, чем в материковом реголите «Луны-20», и это различие с учетом разницы в экспозиционных возрастах четко указывает на лунные породы как источник тонкодисперсного железа. Кроме того, незначительная роль испарения и конденсации метеоритного металла при образовании тонкодисперсного железа указывает также и на малую роль испарения и диссоциации железа лунных пород, поскольку по современным представлениям масса испаряющегося при взрыве вещества мишени примерно равна массе падающего тела. Таким образом, ведущим процессом в образовании суперпарамагнитного тонкодисперсного железа, присутствующего в лунном реголите, является восстановление лунного двухвалентного железа компонентами солнечного ветра. Этот вывод полностью согласуется с полученным в работе [10]. Важное значение, очевидно, имеет также процесс последующего переплавления насыщенных компонентами солнечного ветра частиц реголита под действием микрометеоритной бомбардировки. Об этом свидетельствует высокое содержание тонкодисперсного железа в агглютинатах. Под действием этого процесса может происходить объединение отдельных атомов железа в более крупные агрегаты, обладающие суперпарамагнитными свойствами.

Литература

1. *А. П. Виноградов, В. И. Нефедов, В. С. Урусов, Н. М. Жаворонков.* Рентгеноэлектронное исследование металлического железа в лунном реголите из Морей Изобилия и Спокойствия.— Докл. АН СССР, 1971, 201, № 4.
2. *А. П. Виноградов, В. И. Нефедов, В. С. Урусов, Н. М. Жаворонков.* Рентгеноэлектронные исследования металлического железа в лунном реголите.— Докл. АН СССР, 1972, 207, № 2, с. 433.
3. *И. К. Задорожный.* Инертные газы в гранулометрических фракциях реголита «Луны-16» и «Луны-20».— В кн.: Разделение элементов и изотопов в геохимических процессах. М., «Наука». В печати.
4. *А. В. Иванов, К. П. Флоренский, М. А. Назаров, И. Д. Шевалеевский.* Некоторые проявления процессов испарения и конденсации при образовании частиц лунного реголита.— Докл. АН СССР, 1975, **221**, № 2, с. 458—461.
5. *И. Н. Маров, Ю. Н. Дубров, А. Н. Ермаков.* Электронный парамагнитный резонанс некоторых образцов лунной породы.— В кн.: Лунный грунт из Моря Изобилия. М., «Наука», 1974, с. 323—325.

6. *Л. С. Тарасов, К. П. Флоренский, А. В. Иванов, О. Д. Родэ.* Морфологические особенности и типы частиц реголита, доставленного автоматической станцией «Луна-20» из материкового района Луны.— Геохимия, 1973, № 9, с. 1275—1286.
7. *D. L. Griscom, E. J. Friebele, C. L. Marquardt.* Evidence for a ubiquitons, sub-microscopic magnetite-like constituent in the lunar soils.— Proc. IV Lunar Sci. Conf., 1973, 3, p. 2709—2727.
8. *R. M. Housley, M. Blander, M. Abdel-Gawad, R. W. Grant, A. H. Muir, Jr.* Mössbauer spectroscopy of Apollo 11 samples.— Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 1970, 3, p. 2251—2268.
9. *R. M. Housley, R. W. Grant, M. Abdel-Gawad.* Study of excess Fe metal in the lunar fines by magnetic separation, Mossbauer spectroscopy, and microscopic examination.— Proc. III Lunar Sci. Conf., 1972, 1, p. 1065—1076.
10. *R. M. Housley, R. W. Grant, N. E. Paton.* Origin and characteristics of excess Fe metal in lunar glass welded aggregates.— Proc. IV Lunar Sci. Conf., 3, 1973, p. 2737—2749.
11. *S. L. Manatt, D. D. Elleman, R. W. Vaughan, S. I. Chan, F. D. Tsay, W. T. Huntress, Jr.* Magnetic resonance studies of lunar samples.— Science, 1970, **167**, N 3918, p. 709—711.
12. *T. Nagata, J. Ishikawa, H. Kinoshita, M. Kono, J. Syono, R. M. Fisher.* Magnetic properties and natural remanent magnetization of lunar material.— Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 3, 1970, p. 2325—2340.
13. *S. K. Runcorn, D. W. Collinson, W. O' Reilly, M. H. Battey, A. Stephenson, J. M. Jones, A. J. Manson, P. W. Readman.* Magnetic properties of Apollo 11 lunar samples.— Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 1970, 3, p. 2369—2387.
14. *F. D. Tsay, S. I. Chan, S. L. Manatt.* Ferromagnetic resonance of lunar samples.— Geochim. Cosmochim. Acta, 1971, **35**, p. 865—785.
15. *A. P. Vinogradov, V. I. Nefedov, V. S. Urusov, N. M. Zhavoronkov,* ESCA-investigation of lunar regolith from the Seas of Fertility and Tranquility.— Proc. III Lunat Sci. Conf., 1972, **2**, p. 1471.
16. *R. A. Week, D. Prestel.* Ferromagnetic resonance properties of lunar fines and comparison with the properties of lunar analogues.— Proc. V Lunar Sci. Conf., 1974, 3, p. 2709—2728.

Ордена Ленина Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР, Москва